

РАЗДЕЛ IV. МАТЕМАТИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ [MATHEMATICS. MATHEMATICAL MODELING]

УДК:630*431

DOI: 10.24412/2658-4441-2021-4-46–51

Х.Б. КУУЛАР

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)

РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА ПО ДАННЫМ КОСМОСНИМКОВ LANDSAT ПОСЛЕ ПОЖАРОВ 2002 г.

Представлены результаты изучения пространственно-временной динамики растительности ключевого участка Сангилен в юго-восточной части Республики Тыва. С использованием космоснимков Landsat в программе NextGIS QGIS составлены карты ключевого участка Сангилен, учитывающие пространственно-временную динамику растительного покрова. Картографирование восстановительного процесса растительного покрова проведено с использованием вегетационного индекса NDVI. Рассчитаны площади нарушенных участков (гарей).

Ключевые слова: растительный покров, гари, космоснимки Landsat, вегетационный индекс NDVI.

Рис. 2. Табл. 1. Библ. 15 назв. С. 46–51.

*Работа выполнена в рамках базового проекта ТувИКОПР СО РАН
№ 121030200250-4*

Kh.B. KUULAR

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)

THE VEGETATION COVERS OF SOUTH-EASTERN PART IN TYVA REPUBLIC FOR DATA LANDSAT AFTER WILDFIRE OF 2002 YEAR

We present study results of the spatio-temporal vegetation dynamic in the key plot of South-Eastern part in Tyva Republic. Maps for the key area Sangilen was carried out considering spatial-temporal dynamics of vegetation cover and using Landsat images in the NextGIS QGIS program. Mapping of the regeneration process of vegetation cover was carried out using the index NDVI. The calculation of the areas of disturbed areas (burns) was carried out.

Keywords: vegetation cover, burns, remote sensing images, NDVI.

Figures 2. Table 1. References 15. P. 46–51.

Изучение пространственно-временной динамики растительного покрова даёт представление об их структуре и изменениях в связи с глобальным потеплением климата (Tsendbazar et al., 2021; Schepaschenko et al., 2021). В частности, в последние десятилетия по этой причине усугубляется пожарная ситуация. Данным вопросам и пожарам растительности Сибири посвящено много исследований, в т. ч.: (Валендик и др.,

2014; Софронова, Волокитина, 2017; Сидоров, Санжиева, 2018; Ponomarev et al., 2021; и др.). По прогнозам многих исследователей, изменения климата будут сопровождаться увеличением продолжительности и интенсивности количества и площади пожаров (Tshebakova, Parfenova, 2012). На сегодняшний день актуально создание региональных и локальных карт на основе космических снимков, отражающих пространственно-временную динамику растительного покрова.

Задача данного исследования: составление карт ключевого участка с использованием космических снимков с учётом пожаров растительности.

Исследование было проведено в юго-восточной части республики, участок исследования выделен прямоугольником размера 120 × 80 км (рис. 1). Большая часть исследуемого участка относится к нагорью Сангилен. Район исследования отличается большим разнообразием растительного покрова: от полупустыни до высокогорной тундры и пустошей. По лесорастительному районированию нагорье относится к Сангиленскому округу горных степей, перистепных и горно-таёжных лиственничных лесов, Алтае-Тувинско-Хангайской котловинно-горной лесорастительной провинции горных степей и лиственничных лесов Центрально-Азиатской котловинно-горной лесорастительной области. Бореальные виды являются главными лесообразующими видами исследуемого участка лиственница сибирская (*Larix sibirica*), с небольшой примесью кедра сибирского (*Pinus sibirica*), ели обыкновенной (*Picea obovata*) и лиственных пород (берёзы (*Betula pendula*, *Betula microphylla*), осины (*Populus tremula*)) (Типы лесов ..., 1980).

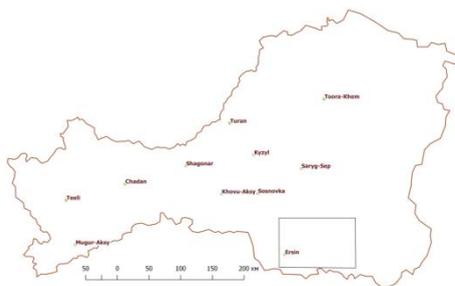


Рисунок 1. Расположение ключевого участка Сангилен (выделено прямоугольником)

Для оценки изменения климата привлекались данные Тувинского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также сведения, имеющиеся в открытом доступе (<http://meteo.ru>). Отклонения температуры воздуха рассчитывались относительно среднего значения базового периода (1961–1990 гг.). Отобраны безоблачные снимки ключевого участка (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). В качестве исходной информации использовались ближний и красный каналы (0,63–0,90 мкм) спутников Landsat ETM+/OLI с пространственным разрешением 30 м. Для оценки повреждения растительного по-

крова пожарами проанализированы три космоснимка за даты 13.09.2000, 11.09.2002 и 09.09.2016. Проведён расчёт вегетационного индекса NDVI с целью получения площади повреждённого растительного покрова до пожара 2002 года. Итоги восстановления растительного покрова после пожаров оценены по данным снимков за даты 11.09.2002 и 09.09.2016 с целью получения размеров площади, пройденной огнём.

Расчёт вегетационного индекса NDVI проведен по следующей формуле (Rouse, 1974):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)},$$

где *NIR*, *RED* — спектральные значения каналов спутника Landsat в диапазонах отражения в ближней инфракрасной, красной областях спектра, соответственно.

Значения индекса NDVI разделены на три класса повреждения. Степень повреждения слабая, если значения NDVI колебались от 0,220 до 0,329. Степень повреждения средняя — от 0,219 до 0,110. Степень повреждения сильная — от 0,109 до 0,055.

Обработка, визуализация результатов и пространственный анализ проведены с помощью программы NextGIS QGIS (<https://nextgis.ru/nextgis-qgis>).

Пожары на территории ключевого участка наблюдались с конца апреля до середины октября, причина их возникновения заключается в том, что с ростом температуры воздуха относительная влажность воздуха снижается. Высокая температура воздуха в сочетании с ветрами — основная причина пожаров. Чрезвычайное пожароопасное состояние характеризуется аномальной температурой и низкой относительной влажностью. В период 1975–2016 гг. относительная влажность воздуха пожароопасного периода составила $50,7 \pm 6,8\%$, аномалия среднегодовой температуры $1,2 \pm 0,2^\circ\text{C}$, тренд потепления составил $0,7^\circ\text{C} / 10$ лет, что является результатом тренда весны на $1,0^\circ\text{C} / 10$ лет, лета на $0,9^\circ\text{C} / 10$ лет.

2002 г. был самым засушливым годом с минимальными значениями годовых осадков (115 мм) и относительной влажности воздуха весны (39,5 %). Длительность засухи составила 83 дня (с 1 апреля по 20 июня). Экстремальная засуха и высокая температура обусловили уязвимость лесов к масштабным пожарам.

Карты NDVI-распределения, построенные для территории исследования (рис. 2), наглядно демонстрируют неравномерность повреждения растительного покрова исследуемого участка. На рисунке 2 а границы гарей выделены красной линией, по рисунку 2 б видно медленное восстановление растительного покрова после пожаров.

Значения вегетационного индекса NDVI показывают, что в 2002 г. рост температуры и уменьшение влагообеспеченности растительного покрова привели к отрицательным последствиям — увеличению масштабных пожаров растительности на территории исследуемого участка и уменьшению значений индекса NDVI. Рост значений вегетационного индекса NDVI к 09.09.2016 г. показывает низкую скорость восстановления растительного покрова.

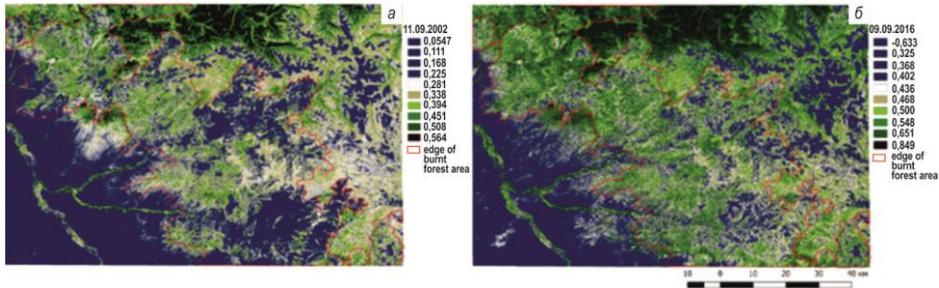


Рисунок 2. NDVI карты ключевого участка Сангилен:
а) космоснимок за дату 11.09.2002; б) космоснимок за дату 09.09.2016

Степень тяжести причинённого повреждения пожарами зависит от преобладающего древостоя (светлохвойные леса (*Larix sibirica*), темнохвойные леса (*Pinus sibirica*, *Picea obovata*)) (Типы лесов..., 1980). Для оценки были выделены типы растительности с учётом состава растительных сообществ. В таблице 1 представлен тип растительности исследуемого участка.

Таблица 1. Значения вегетационного индекса NDVI ключевого участка Сангилен

Типы растительности	Дата съёмки космоснимка		
	13.09.2000	11.09.2002	09.09.2016
	Значения вегетационного индекса NDVI		
Темнохвойные леса (<i>Pinus sibirica</i> , <i>Picea obovata</i>)	0,607 ... 0,679	0,508 ... 0,564	0,632 ... 0,700
Светлохвойные леса (<i>Larix sibirica</i>)	0,320 ... 0,535	0,281 ... 0,451	0,427 ... 0,564
Участки без леса (пустыни, степи, тундры)	0,0332 ... 0,248	0,055 ... 0,225	0,155 ... 0,359

По данным снимка за дату 05.09.2000 на территории исследуемого участка темнохвойные леса занимали 28,9 % площади исследуемого участка, светлохвойные — 19,8 %, редколесья — 1,9 %, тундры — 27,5 %, участки без леса (луга, степи и пустыни) — 17,6 %. В результате масштабного воздействия пожары 2002 г. привели к большой утрате лесного покрова нагорья Сангилен. Расчёты позволили вычислить площади сгоревшего леса. В 2002 г. большую часть занимали гари слабого повреждения (109 897,8 га — 48 % от общей площади гарей), а меньшая часть имеет большие и выше среднего повреждения (52 546,9 га — 23 % от общей площади гарей). Пожарами 2002 г. уничтожены темнохвойные, светлохвойные, мелколиственные леса и кустарники площадью 214 650,7 га, тундры — 29 421,5 га. В результате пожаров площадь участков без леса, степей и лугов увеличилась на 244 324,9 га.

Данные снимка за дату 09.09.2016 показывают площадь и долю растительного покрова через 14 лет после пожаров. Расчёты по снимкам за дату 09.09.2016 показывают восстановление лесов площадью 114 046 га. Проведена наземная сверка, и большую часть составляют кустарники и подрост лиственницы, и уменьшение площади участков без леса, степей, лугов на 141 817 га, тундры — на 15 445,5 га.

Таким образом, карты растительного покрова, составленные на основе космоснимков Landsat, позволяют определить площадь классов растительного покрова, площадь гарей в течение определённого интервала времени. По данным снимка за дату 09.09.2016 повреждённые пожарами участки восстанавливаются с низкой скоростью восстановления из-за особенностей природно-климатических условий. В период 2002–2016 гг. значение гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова (ГТК) равно 0,5, что соответствует сухой зоне по увлажнению (по данным метеостанции Эрзин). В горах значение ГТК выше, но экстремальные весенние и осенние засухи отмечаются регулярно (Пономарев и др., 2018). Леса, ослабленные климатическими трендами, ведут к деградации многолетней мерзлоты и перестройке ландшафтов (Швиденко и др., 2017).

Использование космических снимков Landsat за даты 13.09.2000, 11.09.2002 и 09.09.2016 с разрешением 30 м позволяет решить ряд практических задач, связанных с оценкой реальной ситуации на локальном уровне.

Результаты данной работы показывают: многократные пожары высокой интенсивности являются возможным откликом на региональное потепление климата.

Работа выполнена в рамках базового проекта ТуВИКОПР СО РАН № 121030200250-4.

ЛИТЕРАТУРА

- Булгыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швец Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры на станциях России [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://meteo.ru>, свободный.
- Валендик Э.Н., Кисляхов Е.К., Рыжкова В.А., Пономарев Е.И., Данилова И.В. Крупные пожары в таёжных ландшафтах Центральной Сибири // География и природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 52–59.
- Пономарев Е.И., Скоробогатова А.С., Пономарева Т.В. Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 7. – С. 45–55.
- Сидров А.А., Санжиева С.Е. Хронология лесных пожаров в Республике Бурятия // Вестн. КрасГАУ. – 2018. – № 4 (139). – С. 204–208.
- Софронова А.В., Волокитина А.В. Картографирование растительных горячих материалов методом визуально-инструментального дешифрирования космических снимков // География и природные ресурсы. – 2017. – № 4. – С. 189–196.
- Титы лесов гор Южной Сибири / Под ред. В.Н. Смагина, С.А. Ильинской, Д.И. Назимовой, И.Ф. Новосельцевой, Ю.С. Чередниковой. – Новосибирск: Наука, 1980. – 336 с.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Кракснер З.Ф., Онучин А.А. Переход к устойчивому управлению лесами России: теоретико-методические предпосылки // Сибирский лесной журн. – 2017. – № 6. – С. 3–25

- EarthExplorer*: Набор картографических изображений Геологической службы США [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, свободный.
- Liu Zh., Ballantyne I A.P., Cooper A.L. Increases in land surface temperature in response to fire in Siberian boreal forests and their attribution to biophysical processes // *American Geophysical Union.* – 2018. – Vol. 45 (13). – Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL078283>.
- NextGIS QGIS*: Полнофункциональная настольная ГИС [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <https://nextgis.ru/nextgis-qgis>, свободный.
- Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia // *Atmosphere.* – 2021. – № 12 (559). – DOI: [org/10.3390/atmos12050559](https://doi.org/10.3390/atmos12050559).
- Rouse JR.J.W., Haas R.H., Shell, J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.* In 2 vol. (10–14.12.1973, Washington). – Washington DC, 1974. – Vol. 1. – P. 309–317.
- Schepaschenko D., Karminov V., See L., Shvidenko A., Lesiv M., Fritz S., Kraxner F., Moltchanova E., Fedorov S., Ontikov P., Kositsyn V., Shchepashchenko M., Santoro M., Romanovskaya A., Korotkov V., Bartalev S. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // *Scientific Reports.* – 2021. – T. 11. – № 1. – 12825. – DOI: [10.1038/s41598-021-92152-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9).
- Tchebakova N., Parfenova E. The 21st century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia // *Bosque.* – 2012. – № 33 (3). – P. 253–259. – DOI: [10.4067/S0717-92002012000300004](https://doi.org/10.4067/S0717-92002012000300004) (00.429).
- Tsendbazar N., Herold M., Li L., Tarko A., Bruin S. de Masiliunas D., Lesiv M., Fritz S., Buchhorn M., Smets B., Kerchova R. Van De, Duerauer M. Towards operational validation of annual global land cover maps // *Remote of Environment.* – 2021. – № 266. – 112686. – DOI: [org/10.1016/j.rse.2021.112686](https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112686).

REFERENCES

- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Opisanie massiva dannykh srednemesyachnoi temperatury na stantsiyakh Rossii [Description of the data array of the average monthly temperature at the stations of Russia]. Available at: <http://meteo.ru>. (In Russ.)
- Liu Zh., Ballantyne I A.P., Cooper A.L. Increases in land surface temperature in response to fire in Siberian boreal forests and their attribution to biophysical processes. *American Geophysical Union*, 2018, vol. 45 (13). – Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018GL078283>.
- NextGIS QGIS. Fully functional desktop GIS. Available at: nextgis.ru/nextgis-qgis/.
- Ponomarev E., Yakimov N., Ponomareva T., Yakubailik O., Conard S.G. Current Trend of Carbon Emissions from Wildfires in Siberia. *Atmosphere*, 2021, no. 12 (559), doi: [org/10.3390/atmos12050559](https://doi.org/10.3390/atmos12050559).
- Ponomarev E.I., Skorobogatova A.S., Ponomareva T.V. Gorimost' lesov Sibiri i mezhsezonnnye variacii urovnya teplo- i vlagoobespechennosti [Wildfire occurrence in Siberia and seasonal variations in heat and moisture supply]. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian meteorology and hydrology*, 2018, no. 43 (7), pp. 456–463. (In Russ.)
- Rouse JR.J.W., Haas R.H., Shell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium.* In 2 vol. (10–14.12.1973, Washington). Washington DC, 1974, vol. 1, pp. 309–317.
- Schepaschenko D., Karminov V., See L., Shvidenko A., Lesiv M., Fritz S., Kraxner F., Moltchanova E., Fedorov S., Ontikov P., Kositsyn V., Shchepashchenko M., Santoro M., Romanovskaya A., Korotkov V., Bartalev S. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, 12825, doi: [10.1038/s41598-021-92152-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-92152-9).
- Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G., Kraxner Z.F., Onuchin A.A. Perekhod k ustojchivomu upravleniyu lesami rossii: teoretiko-metodicheskie predposylki [Transition to sustainable forest management in russia: theoretical and methodological backgrounds]. *Sibirskij Lesnoj Zurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 3–25. (In Russ.)

- Sidrov A.A., Sanzhiyeva S.Ye. Khronologiya lesnykh pozharov v Respublike Buryatiya [The Chronology of forest fires in the Republic of Buryatia]. *Vestnik KrasGAU = The Bulletin of Kras GAU*, 2018, no. 4 (139), pp. 204–208. (In Russ.)
- Sofronova A.V., Volokitina A.V. Kartografirovaniye rastitel'nykh goryachikh materialov metodom vizual'no-instrumental'nogo deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov [Vegetation fuel mapping by the method of visual-instrumental interpretation of space images]. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*, 2017, no. 4, pp. 189–196. (In Russ.)
- Tchebakova N., Parfenova E. The 21st century climate change effects on the forests and primary conifers in central Siberia. *Bosque*, 2012, no. 33 (3), pp. 253–259, doi: 10.4067/S0717-92002012000300004 (00.429).
- Tipy lesov gor Yuzhnoj Sibiri* [Types of forests in the mountains of Southern Siberia] / ed. by V.N. Smagin, S.A. Il'inskaya, D.I. Nazimova, I.F. Novosel'ceva, Yu.S. Cherednikova. Novosibirsk, Nauka Publ, 1980, 336 p. (In Russ.)
- Tsendbazar N., Herold M., Li L., Tarko A., Bruin S. de, Masiliunas D., Lesiv M., Fritz S., Buchhorn M., Smets B., Kerchove R. Van De, Duerauer M. Towards operational validation of annual global land cover maps. *Remote of Environment*, 2021, no. 266, 112686, doi: org/10.1016/j.rse.2021.112686.
- USGS. Earth Explorer. Available online: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- Valendik E.N., Kisilyakhov E.K., Ryzhkova V.A., Ponomarev E.I., Danilova I.V. Krupnye pozhary v taezhnykh landshaftah Central'noj Sibiri [Conflagration Fires in Taiga Landscapes of Central Siberia]. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and Natural Resources*, 2014, no. 35 (1), pp. 41–47, doi: 10.1134/S1875372814010065. (In Russ.)

УДК: 528.88

DOI: 10.24412/2658-4441-2021-4-51-58

А.Ф. ЧУЛЬДУМ

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Кызыл, Россия)

ПОЛУЧЕНИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ТУВЫ НА ПЛАТФОРМЕ Google Earth Engine

В настоящей работе построены карты средних значений вегетационных индексов NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI по территории республики Тыва с мая по сентябрь на период с 2000 по 2020 годы с использованием открытой облачной платформы для геопространственного анализа данных Google Earth Engine (GEE). Изучена динамика вегетационных индексов по времени. Перечислены преимущества использования открытой платформы GEE для доступа к данным дистанционного зондирования (ДЗЗ), построению карт, геопространственного анализа данных.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, вегетационные индексы, NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR, SIPI, Google Earth Engine.

Рис. 3. Библ. 11 назв. С. 51–58.

A.F. CHULDUM

Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of SB RAS (Kyzyl, Russia)

OBTAINING VEGETATION INDICES FOR TUVA ON THE Google Earth Engine PLATFORM

Maps of the average values of the vegetation indices NDVI, SAVI, ARVI, EVI, GCI, NBR and SIPI for the territory of the Republic of Tuva from May to September for the period from 2000 to 2020 were built using an open-source cloud platform for geo-